



TITLE:

運動神経部分的切除後の筋内神経支配型式の変化

AUTHOR(S):

大石, 保

CITATION:

大石, 保. 運動神経部分的切除後の筋内神経支配型式の変化. 日本外科宝
函 1957, 26(3): 388-395

ISSUE DATE:

1957-05-01

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/206374>

RIGHT:

運動神経部分的切除後の筋内神経支配型式の変化

山口医科大学整形外科科学教室 (指導: 伊藤鉄夫教授)

大 石 保

〔原稿受付: 昭和32年2月14日〕

CHANGE IN THE PATTERN OF MOTOR INNERVATION IN THE STRIATED MUSCLE CAUSED BY PARTIAL DENERVATION

TAMOTSU OISHI

Orthopedic Department, Yamaguchi Medical School, Ube.

(Director: Prof. Dr. Tetsuo Ito)

1) In the mm. tibialis anticus and extensor digitorum longus of the rabbit, which are innervated by the fifth, sixth and seventh lumbar segments, changes in the isometric tension and the pattern of motor innervation of the muscle caused by removal of the sixth lumbar nerve were followed for a period of sixty days.

2) There occurred no marked decrease in the force of contraction five days post-operatively, the muscle tension produced by stimulation of the peroneal nerve being maintained at 96.8 per cent of the contralateral control.

This finding suggests that the overlapping innervation of a single muscle fibre by different spinal nerves prevents complete denervation by such partial neurectomy.

3) After operation, the force of contraction developed by stimulation of the seventh lumbar nerve and the peroneal nerve gradually increased. Thirty days post-operatively, it was larger than the control side (Figs. 1 and 2).

This spontaneous improvement is thought to be due to reinnervation of the denervated muscle fibres by branches from the surrounding surviving nerve fibres, and also probably due to hypertrophy of the muscle fibres.

4) Histological examination by the gold-chloride-formic acid technique revealed that the intramuscular branches of the intact motor nerve fibres undergo additional branching and take over the supply of the denervated muscle fibres.

Five days post-operatively, these terminal branches were of small diameters and had no node of RANVIER (Figs. 3, 4, 5 and 6). These collateral branches gradually increased in number with the lapse of time.

Sixty days post-operatively, the terminal branches markedly increased in number and formed a fine intricate network by anastomosis with each other (Figs. 9, 10, 11 and 12).

5) As a result of luxuriant terminal branching of the remaining motor nerves and adoption of muscle fibres which had originally been innervated by the sixth lumbar nerve, the size of the motor units increased considerably.

Exner (1884, 1885) は *M. cricothyroideus* を支配する *N. laryngeus superior and medius* の何れか一方を切断したのでは筋の変性は起らないことを見出したが、その後この問題は永く解決されないままに放置されていた。併し Harreveld (1945), Hines, Wehrmacher and Thompson (1945), Weiss and Edds (1945) が殆んど同時にこの問題を取上げ、骨格筋支配神経部分的切除後に残存神経線維が一度神経支配を失った筋線維を再び支配する可能性があることを電気生理学的に証明した。その後更に Hoffmann (1949) は鼠に於て、又 Edds and Small (1951) は猿に於て、この事を組織学的に検索し、健存神経線維より側枝が形成され、一度神経支配を失った筋線維が再び神経支配を獲得することを証明した。この様な事は各運動単位が解剖学的に互いに独立しているのでは起り得ないはずである。著者は先に骨格筋運動神経支配型式の研究に於て、gold-chloride-formic acid technique を用いて *M. tibialis anticus* 及び *M. extensor digitorum longus* に於て筋内運動神経分布を検索し、1個の運動単位に属する筋線維群は一束をなして独立して存在するものではなく、異つた運動単位に属する筋線維群が互いに混在し、而も多数の筋線維が異つた運動単位の神経線維によつて重複支配を受けていることを証明することが出来た。この様な構造は筋神経支配機構をその障害から護るための合目的な構造であると考えることが出来る。それ故に或る運動単位の神経が障害を受けた場合には神経支配を失った筋線維は筋内に広く分散して存在し、その間に正常の神経支配を受けている筋線維が介在するはずである。従つて健存神経線維からの分枝が再び筋を支配すると云うことも充分可能であると思われる。そして若しこの様なことが起る場合には、筋の運動神経支配の型式に大きな変化が起る筈である。著者は家兎の *M. tibialis anticus* 及び *M. extensor digitorum longus* に就いて、運動神経部分的切除後に起る筋内運動神経分布型式の変化を追及した。

実験方法

実験材料としてすべて成熟家兎後肢の、*M. tibialis anticus* 及び *M. extensor digitorum longus* を用いた。該両筋は第5、第6及び第7腰髄神経によつて支配されており、且つこれ等の脊髄神経より成る腓骨神経を傷つけることなくしては両筋を分離することが出来ないの、該両筋を一束として実験に用い

た。本実験に於ては、該両筋を支配する運動神経を部分的に切除するために、開腹によつて第6腰髄神経に到達し、これを椎間孔通過直後の部位に於て約1cmの長さに亘つて切除し、その末梢断端を折曲げて附近の筋内に挿入した。術後5日目、20日目、40日目及び60日目に、第7腰髄神経及び腓骨神経電気刺激によつて等長性張力を測定した後に、該筋を gold-chloride-formic acid technique によつて染色した。神経電気刺激の方法及び染色方法は骨格筋運動神経支配型式に於て述べた方法と同様である。又筋標本の一部には haematoxylin eosin 染色を行い、筋線維の変化の検索に供した。

実験成績

1. 筋張力の変化

家兎の第6腰髄神経を切断すると、術側後肢は麻痺性尖足位をとり、足関節の他動的底屈に対して何等の抵抗も示さない。歩行時には足背を床につけて跛行する。術後3日目より自動的に足底を床につけて正常の足位をとる様になるが、跳躍歩行時に術側後肢で床を蹴る時慣性によつて足関節は強く底屈して足を投げ出す。又家兎を抱き上げて後肢を下垂せしめると尖足位をとり、足底を刺激しても足関節を背屈しない。術後7日乃至10日では、この様な症状は殆んど消失し、唯跳躍時にのみ僅かに術側後肢が残る傾向がある。術後1月では症状は全く恢復し、健側肢との差異は認められない様になる。

以上の様な手術を20匹の家兎に行い、術後5日目、20日目、40日目及び60日目に各5匹宛をとり、両側第7腰髄神経及び腓骨神経電気刺激を行つて *M. tibialis anticus* 及び *M. extensor digitorum longus* の等長性張力を測定した。その成績は Table 1, 2, 3 及び 4 の通りである。

第7腰髄神経刺激によつて生ずる等長性張力は術後5日目 (Table 1) では健側のそれに比して稍々小であつて、平均94.6%の張力減少が見られる。唯第2例だけは健側のそれより大である。この張力は術後日を経るに従つて増大する傾向がある。

術後20日目 (Table 2) では、術側の筋張力は健側のそれに比して103%となり、5例中3例までが健側張力よりも大である。併し尚2例では健側張力よりも小である。

術後40日目 (Table 3) では術側の筋張力は健側のそれに比してかなり明瞭な増大を示し、平均108.4%

Table 1 術後5日目に於ける等長性筋張力

	L ₇ (g)			N. fibularis (g)		
	手術側 (A)	健側 (B)	A/B×100	手術側 (A)	健側 (B)	A/B×100
1	130	140	93	212	220	96
2	133	130	102	205	210	97
3	125	132	95	220	225	96
4	120	130	92	218	227	96
5	115	125	92	190	192	99
平均	124.6	131.4	94.6	209	214.8	96.8

Table 2 術後20日目に於ける等長性筋張力

	L ₇ (g)			N. fibularis (g)		
	手術側 (A)	健側 (B)	A/B×100	手術側 (A)	健側 (B)	A/B×100
1	112	103	108	158	145	109
2	90	83	108	150	140	107
3	98	100	98	160	163	98
4	109	113	96	195	195	100
5	112	106	105	202	188	107
平均	104.2	101	103	173	166.2	104.2

Table 3 術後40日目に於ける等長性筋張力

	L ₇ (g)			N. fibularis (g)		
	手術側 (A)	健側 (B)	A/B×100	手術側 (A)	健側 (B)	A/B×100
1	125	115	108	150	138	108
2	158	142	104	258	240	107
3	128	116	110	250	235	106
4	132	110	120	156	140	111
5	163	163	100	248	232	106
平均	141.2	129.2	108.4	212.4	197	107.6

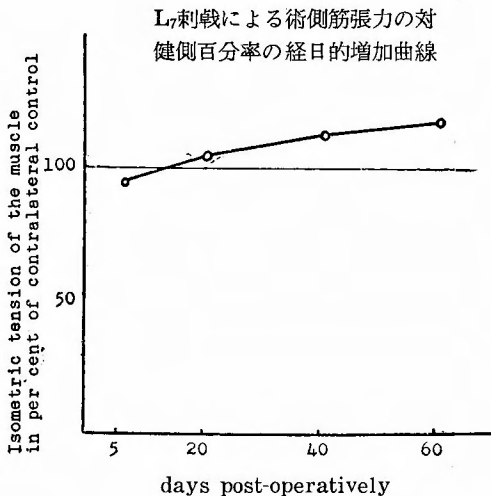
Table 4 術後60日目に於ける等長性筋張力

	L ₇ (g)			N. fibularis (g)		
	手術側 (A)	健側 (B)	A/B×100	手術側 (A)	健側 (B)	A/B×100
1	123	105	117	220	198	111
2	175	143	123	282	255	110
3	172	140	122	248	220	112
4	176	152	115	267	245	108
5	148	126	117	216	198	109
平均	158.8	133.2	118.8	246.6	223.2	110

である。而も5例共健側筋張力よりも大である。この時期は臨床でも術後後肢の症状が既に完全に消失している時期に相当している。

術後60日目 (Table 4) では、術側の筋張力は著明に増強しており、健側のそれに比して平均 118.8% を示している。而も5例共筋張力の増強が認められる。殊に第2例は123%, 第3例は122%を示している。以上の様な筋張力の経日的恢復曲線を描くと (Fig. 1) の様になる。次に腓骨神経電気刺激によつて生ずる筋張力は先に示した Table 1, 2, 3 及び 4 の通りである。

Fig. 1



術後5日目 (Table 1) では、術側の筋張力は健側のそれに比して 96.8% で僅かに小である。併しこの値は第6腰椎神経切断によつて予想される値よりも遙かに大であることは注目すべきことである。

術後20日目 (Table 2) では、術側の筋張力は増強し、健側のそれに比して 104.2% である。

術後40日目 (Table 3) では、術側の筋張力は更に増強し、健側のそれに比して 107.6% を示している。

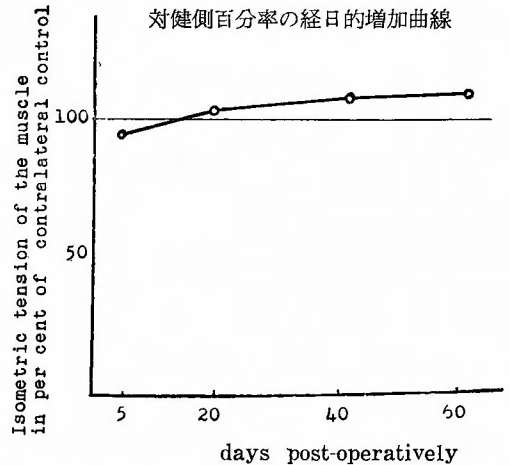
術後60日目 (Table 4) では、術側の筋張力は健側のそれに比して 110% を示し、術側の筋張力は次第に増強して行く。この様な筋張力の変化を経日的に示すと (Fig. 2) の様になる。

2. 骨筋内神経支配型式の変化

第6腰椎神経切断後, M. tibialis anticus 及び M. extensor digitorum longus 内の神経線維を gold-chloride-formic acid technique によつて染色した。神経線維に於ても筋張力の変化に平行して経日的に明瞭な変化が認められる。

Fig. 2

腓骨神経刺激による術側筋張力の対健側百分率の経日的増加曲線



術後5日目の標本では至る所に正常の神経線維が見られるが、所々に Fig. 3 に示す様な変性に陥つた神経線維を見る。この標本では2本の神経線維がその神経終末まで変性しているのを明瞭に認めることが出来る。併し既に Fig. 4 に示す様に正常神経線維のランビール氏絞窄部附近より細い側枝の形成が始つている像が見られる。又既に神経終末の形成を完了した新生神経線維も見出すことが出来る。Fig. 5 では2本の細い神経線維が右下部より左方に向つて走り、夫々神経終末に連なつている。この神経線維は甚だ細く、まだランビール氏絞窄を認めることが出来ない。この線維を同じ標本の他の2本の正常神経線維と対比するときには極めて明瞭な差異を認めることが出来る。尚この正常神経線維に沿つて変性した神経鞘が上向しているが、その途中矢印の部では新しい細い神経線維が正常神経線維から分岐して行く像が見られる。この様に健存神経線維よりの側枝新生は末梢部に於て起り、変性した神経鞘に沿つて伸びて行き、遂に筋線維に到達して、こゝに神経終末を形成するものと思われる。

Fig. 6 では側枝による神経終末形成を完了した2本の神経線維が認められる。これを他の正常神経線維と比較すると、甚だ細く、ランビール氏絞窄も見られない。併し神経終末の構造は極めて明確である。

以上の標本で明かな様に、骨筋支配運動神経の一部を切除するときは、変性神経線維は筋内の一部に局限することなく、広く筋内に分散する。そして、これに隣接する健存神経線維から速かに側枝が新生されて、これが変性神経鞘に沿つて伸び、遂に神経支配を失つた筋線維に到達して、こゝに神経終末を形成して

再び神経支配を行うものと考えられる。

術後20日目の標本では既に細い神経線維を見出すことは困難である。臨床上でも術後の跛行は殆んど消失している。Fig. 7及び8は神経線維の分岐が多い部分を示したものである。正常神経線維に比して終末分岐率が少々大であるが細い神経線維は認められない。

術後60日目では既に跛行は完全に回復しており、又神経刺激実験は術側の筋張力が健側のそれよりも増大していることを示している。この時期の神経線維の像は甚だ特徴的である。Fig. 9及び10はおびただしい終末分岐を示す像である。殊にFig. 10の標本は右上方より左方に向う神経線維束であるが、左方に向うに従って神経線維束が太くなり、甚だ多数の分枝を出している。そして既に神経線維は太く、且つ明瞭なランビール氏紋窄を示している。この様な像は正常の筋に於ては決して見られない。又Fig. 11及び12では神経分枝が交錯して細い網の目を構成している像が見られる。これに類似の像は正常像の研究に於て認めたのであるが、こゝに示す様な細い網の目構造は正常の筋に於ては見出すことが出来ない。尚術後60日目に筋の横断面の haematoxylin eosin 染色標本では筋線維の変性や萎縮の像は全く認められない。

考 察

(1) 家兎の第6腰椎神経切断後5日目に於ける腓骨神経刺激によつて生ずる筋張力は健側のそれに比して96.8%であつて、筋張力の低下は甚だ軽度である。これは既に証明した様に多くの筋線維が第5、第6及び第7腰椎神経によつて重複支配を受けているために、第6腰椎神経切断によつて神経支配を失う筋線維の数が予想外に少いことを示すものである。

尚組織標本でも証明された様に術後5日目には既に健存神経線維からの側枝形成によつて一度神経支配を失つた筋線維が再び神経支配を獲得する様になるけれども、それが筋力回復に於て果たす役割はこの時期に於ては未だ少いものと思わなければならない。それはこの時期に於ける第7腰椎神経刺激によつて生ずる筋張力に未だ著しい増強が見られないことから想像されることである。更に日を経るに従つて筋力は増強するが、これは主として神経支配を失つた筋線維が再び神経支配を回復することによるものと考えられる。尚術後1月では術側の筋張力が健側のそれよりも増強するが、これは筋線維の収縮力が増強することによると考えなければならない。

(2) 本実験に於て術後に筋内の変性神経線維は一部に限局する事なく、筋内に広く分布し、その間に多数の健存神経線維が介在する。この事は1個の運動単位に属する筋線維が筋内に於て一束をなすことなく、広く分散して分布しており、その間に異つた運動単位に属する筋線維が介在することを証明するものであつて、著者が既に正常の神経支配型式の研究に於て得た結論を更に強く支持するものである。

骨骼筋支配運動神経を部分的に切除した場合には、上記の様な神経分布を有するために、変性神経線維に隣接する健存神経線維から出る側枝によつて一度神経支配を失つた筋線維が再び神経支配を獲得する様になる。而もこの分枝新生は術後直ちに開始され、日を経るに従つてその数を増加してゆく。本実験では術後60日まで経過を追及したのであるが、その後も尚数を増す可能性がある。術後60日目に於ては健存神経線維の末梢部からの分枝は既に甚だ多数となり、屢々分枝が互いに吻合して細い網の目構造を示し、その像は極めて特徴的である。而も筋線維の変性は見られない。この様な筋に於ては神経支配型式が甚しく変化している筈である。即ち運動単位の数が減少し、1個の運動単位に属する筋線維の数が増加している筈である。この様に運動単位の構造は一定不変のものではなく、一度運動単位の一部が障害を受けるときは、隣接する運動単位が上記の様な重大な変化を成し遂げて、筋変性を防止する能力を有している。

(3) 以上の事実からして、神経筋機構はその部分的神経障害に対して、筋線維の重複神経支配、健存神経線維よりの側枝形成及び筋線維収縮力増強等によつてその機能を維持又は回復する能力を有することが明らかになった。この事は臨床上にも重大な意義を有す。脊髄前角炎後、日を経るに従つて筋力が回復することには色々の原因が考えられる。即ち脊髄に於ける炎症が鎮静するに従つて、一時的に機能を失つていた運動神経細胞が機能を回復することも原因の一つであらうと思われるし、又残存筋線維が練習によつて肥大することも原因たり得る。併し本実験に於て証明された様に運動単位の構造が変化して、1個の運動単位がより多数の筋線維を支配することによつて神経支配を失つた筋線維をその変性から免れしめると云うことは甚だ重大な意義を有するであらうと思う。又四肢の座性麻痺に対し、支配神経の部分的切除によつて筋緊張を低下せしめんとする Stoffel 氏手術は日常屢々行われている治療法であるけれども、術後の効果は日を経る

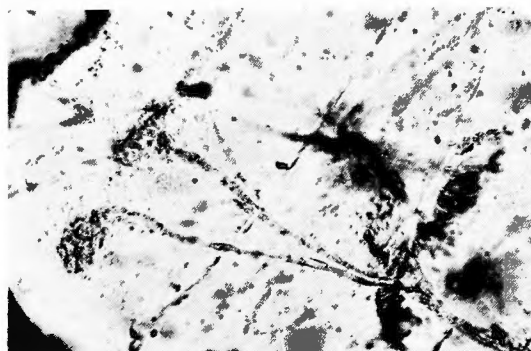


Fig. 3. 術後5日目. 変性に陥つた神経線維.



Fig. 4. 術後5日目. 正常神経線維のランビール氏絞窄部附近より細い側枝が出ている. まだ神経終末は形成されていない.

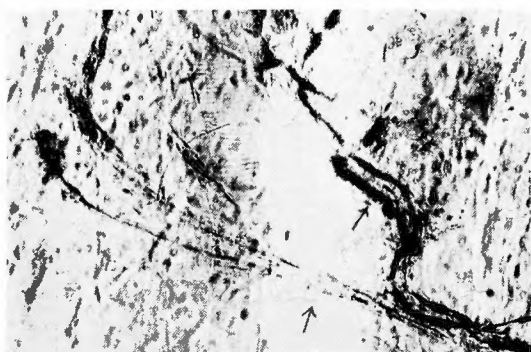


Fig. 5. 術後5日目. 細い新生神経線維と神経終末が形成されている. 上向する2本の太い正常神経線維の間に細い新生神経線維が伸びている.

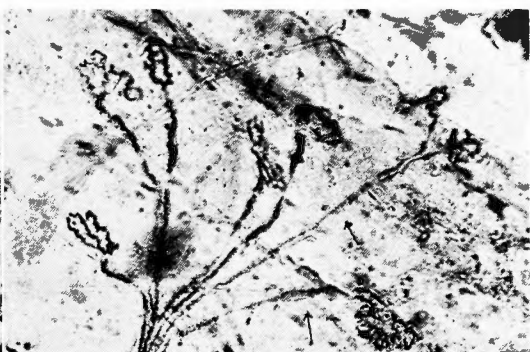


Fig. 6. 術後5日目. 細い新生神経線維と神経終末が形成されている.

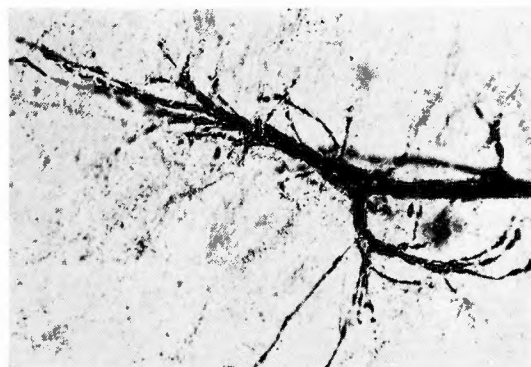


Fig. 7. 術後20日目. 多数の神経分枝形成.

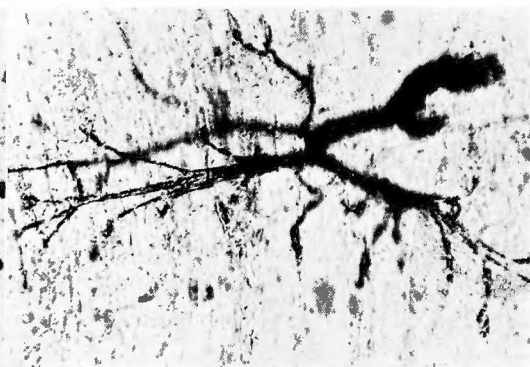


Fig. 8. 術後20日目. 多数の神経分枝形成.



Fig. 9. 術後60日目，多数の神経分枝形成。



Fig. 10. 術後60日目，多数の神経分枝形成。この神経線維束は右より左に向つて走り，末梢に至るに従つて太くなり，多数の分枝を出している。

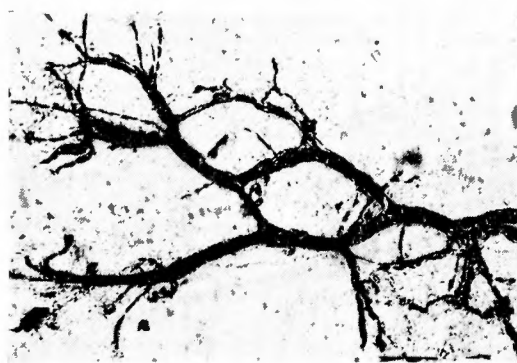


Fig. 11. 術後60日目，多数の神経線維が吻合して網の目構造を形成している。



Fig. 12. 術後60日目，多数の神経線維が吻合して網の目構造を形成している。

に従つて次第に減少し、症状の再発を来すものが少ない。この様なことは本実験の結果から当然に予想されることであつて、健存神経線維よりの側枝形成によるものと思われる。

結 論

(1) 家兎の第6腰髄神経を切断した後に、*M. tibialis anticus* 及び *M. extensor digitorum longus* の筋張力及び筋運動神経支配型式の変化を経日的に検索した。

(2) 第6腰髄神経切断後に於ても、筋力の著しい低下は起らない。これは第5、第6及び第7腰髄神経によつて重複神経支配を受けている筋線維が多数存在しているために、部分的神経切除によつて完全に神経支配を失う筋線維の数が少ないことによるものと考えられる。

(3) 術後第7腰髄神経及び腓骨神経刺戟によつて生ずる筋張力は経日的に増強し、術後1月には術側の筋張力は健側のそれより増強する。この筋力の増強は健存神経線維よりの側枝形成によつて神経支配を失つた筋線維が再び神経支配を受けることの外、各筋線維の収縮力の増強によるものと考えられる。

(4) 1個の運動単位に属する神経線維は他の運動単位に属する神経線維と吻合分岐を反覆して網の目構造をなして筋内に広く分散している。従つて筋支配神経の部分的切除によつて神経支配を失う筋線維も亦筋内に分散しており、その間に正常神経支配を有する筋線維が介在する。この健存神経線維から側枝が形成されて変性した神経鞘に沿つて伸び、一度神経支配を失つた筋線維が再び神経支配を恢復する。

(5) 筋支配神経部分切除によつて該筋を構成する運動単位の数には減少するが、健存神経線維より形成される側枝の数は術後日を経るに従つて増加するために1個の運動単位に属する筋線維の数も亦増加する。従つ

て筋内神経線維の終末分岐の率は甚だ大となり、これ等の分枝は屢々互いに吻合して細い網の目構造をとる。

(6) 神経筋機構は神経の部分的障害に対して、筋重複神経支配、健存神経線維よりの側枝形成及び筋収縮力増強によつて筋の機能を維持又は恢復する能力を有す。

文 献

- 1) Bowden, R. E. M. and Gutmann, E. : Denervation and re-innervation of human voluntary muscle. *Brain*, **67**; 273, 1944.
- 2) Carey, E. J. : Studies on ameboid motion of motor nerve plates. *Am. J. Path.*, **18**; 242, 1942.
- 3) Edds, M. V. and Small, W. T. : The behavior of residual axons in partially denervated muscles of the monkey. *J. Exp. Med.*, **93**; 207, 1951.
- 4) Feindel, W. H., Sinclair, D. C. and Weddel, G. : A new method for investigating the nervous system. *Brain*, **70**; 495, 1947.
- 5) Feindel, W., Hinshaw, J. R. and Weddel, G. : The pattern of motor innervation in mammalian striated muscle. *J. Anat.*, **83**; 35, 1952.
- 6) Harreveld, A. V. : Re-innervation of denervated muscle fibres by adjacent functioning motor units. *Am. J. Physiol.*, **144**; 477, 1945.
- 7) Harreveld, A. V. : On the mechanism of the "spontaneous" re-innervation in paretic muscles. *Am. J. Physiol.*, **150**; 670, 1947.
- 8) Hoffmann, H. : Local re-innervation in partially denervated muscle. : A histo-physiological study. *Austral. J. Biol. Med.*, **28**; 383, 1950.
- 9) Mitchell, G. A. G. : Visceral nerve demonstrated by combined intra-vital and supravital techniques. *Acta anat.*, **18**; 81, 1953.
- 10) Morris, D. D. R. : Recovery in partly paralysed muscles. *J. Bone & Joint Surg.*, **35-B**; 650, 1953.
- 11) Weiss, P. and Edds, M. V. : Spontaneous recovery of muscle following partial denervation. *Am. J. Physiol.*, **145**; 587, 1946.